通量塔
－氣象監測之新發展趨勢

農試所農工組 姚銘輝 陳守泓 蔡致榮

一、前言

氣象監測是農業生產及生態永續經營的重要工作，尤其是面對未來可能亟劇改變之氣候情景，氣象訊息的收集及分析更顯得迫切。但整個農業生態是複雜的體系，如微氣候能量分布，碳素轉換機制，及水分循環流布等，無法僅由近地面的氣象因子，包括輻射量、風速、氣溫、相對濕度和降雨量等資料說明，必需更精確量測大氣渦流(eddy)及氣象通量(flux)之瞬間變化，才能對各項能量的產生、傳送及轉換有所瞭解。所謂氣象通量包括長、短波輻射，可感熱(sensible heat)、潛熱(latent heat)及向土壤傳導的能量。通量間可相互轉換，例如來自太陽的短波輻射為作物植冠(canopy)所吸收，同時土壤及葉片表面以潛熱及可感熱的能量方式，將長波輻射向大氣傳送，這些能量轉換過程受地表特性如植生、地形、土壤水分含量等影響，雖然作物生長環境隨大氣環境而不同，但仍依循能量平衡的基本學理，而藉由通量的量測，則更能瞭解近地面微氣象的變化。

作　　者：姚副研究員銘輝
連絡電話：04-23302301-7715

本文主要介紹大氣以渦流形式傳送能量之特性，以及如何透過通量量測技術掌握渦流變化，以供長期環境監測應用。同時，目前依據通量量測技術所建置之通量塔在國際已廣泛設立，透過網站進行觀測經驗及資料相互交流，形成全球性之觀測網，此項研究潮流能擴大農業環境觀測之深度及廣度，有助於對農業生態環境的觀測。

二、大氣渦流特性

空氣流動是由無數個旋轉的渦流所組成，每一個渦流擁有三維的立體結構，同時具有水汽、熱能及化學組成的差異，而任何微小的擾動會影響渦流移動的速度及方向。為了掌握渦流瞬間的變化，氣象學家利用通量觀念來描述渦流的特性，通量是指固定時間及單位面積內物質流動的速率，但如何量測及統計大氣渦流之瞬間通量？一般利用共變異數（covariance）方式計算通量，此項觀念很早就被提，但為了量測各種渦流的變化，由於量測及運算儲存速度需極快，一般至少0.1秒（10Hz）才能掌握渦流快速變化，在當時因儀器上的限制，很難進行實際量測工作。最近十幾年來，由於電腦運算及儲存速度大幅提昇，才發展成具有實測功能的系統。

植物生長的能量來自於太陽輻射，包括作物群落光能的吸收，地面長波輻射的反射，及水汽的蒸發散等，都和渦流的垂直變化有關。以農田物理能量的平衡而言，可由五種能量項組成，分別說明如下：

R_n+H＋LE＋G＋Q= 0……………(1)

R_n：植冠上方之淨輻射通量($W\ m^{-2}$)

H：可感熱通量($W\ m^{-2}$)

LE：潛熱通量($W\ m^{-2}$)

G：向土壤之傳導熱($W\ m^{-2}$)

Q：作物熱能儲存($W\ m^{-2}$)

其中作物熱能儲存項因能量甚微，一般可忽略不計。就上式中四項能量項，潛熱及可感熱是由地面向大氣排出之能量項，而淨輻射通量及土壤傳導熱為向地面之能量項。可用向上及向下能量項之比值（即LE+H / Rn+G）作為能量是否平衡的指標，一般稱為closure ratio。 Kizer and Elliott 認為農田之closure ratio 值可容許範圍為0.7-1.3之間。

通量量測是以渦流相關系統(eddy correlation system)進行量測，以作物植冠上方之水汽通量為例，利用氪濕度計（Krypton hygometer）量測空氣中絕對溼度，該儀器可放射出兩種紫外光波段（123.6及116.5 nm），此兩波段可同時為水汽和氧氣所吸收，配合三維音波風速計(sonic anemometer)及極細熱電偶(E-type thermocouple)，可計算潛熱及可感熱。其中潛熱為作物群落上方水汽散失量，可作為水田蒸發及葉片蒸散之總量。而二氧化碳通量之量測方法可分為兩種，一種為密閉式量測，將不同高度之二氧化碳氣體抽入紅外線氣體分析儀(infrared gas analyzer, IRGA)，利用不同高度之二氧化碳差值作為群落上方之CO_2通量之量測。另一種為開放式量測方法，以二氧化碳及水汽之吸收波長作為量測，此原理與氪濕度計相同，二氧化碳吸收光譜波長為4.26 μm，水汽吸收光譜波長為2.59 μm，同樣地，配合三維音波風速計及熱電偶線，經由程式運算也可得到瞬間二氧化碳通量、水汽通量及可感熱等。通量計算是在一合適的平均值期間，由量測因子的波動（fluctuations）變化量，經由相叉相關性（cross correlation）計算通量，其中潛熱項（LE）是由絕對濕度和垂直風速的共變異數求得；可感熱項（H）是由溫度和垂直風速的共變異數求得；二氧化碳通量項（CO_2）是由二氧化碳濃度和垂直風速的共變異數求得。公式如下所示。

$LE = L\overline{W'X'}$………………………(2)

$H = \rho Cp\overline{W'T'}$……………………(3)

$CO_2 = \overline{W'\rho c'}$

L：水汽化之潛熱 ($J\ g^{-1}$) (常數)

$\overline{W'}$：垂直風速之波動值 ($m\ s^{-1}$)

$\overline{X'}$：絕對濕度之波動值 ($g\ m^{-1}$)

ρ：空氣密度($kg\ m^{-3}$) (常數)

Cp：定壓下之空氣比熱($J\ kg^{-1}\ ℃^{-1}$)(常數)

$\overline{T'}$：氣溫之波動值(℃)

$\overline{\rho c'}$：二氧化碳濃度之波動值($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

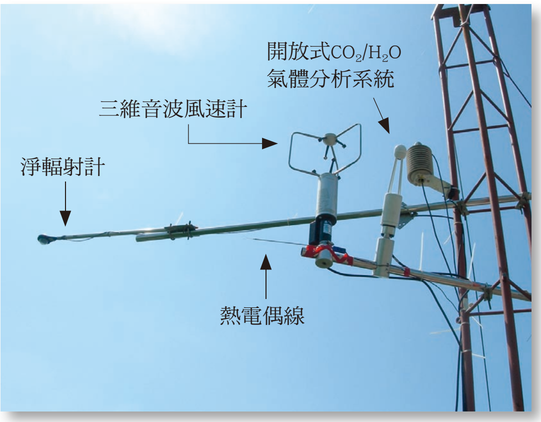
Brutsaert 認為渦流量測系統應具有感測器反應時間快，平均時期長及偵測速度精確等條件。一般取樣間距為0.1秒(10Hz)，每10分鐘取一次平均。另選擇渦流量測的環境是相當嚴格，其中以量測田區吹風距離(fetch)的影響最為重要，所謂吹風距離是指作物植冠所形成的觀測面積，一般認為比值應為100：1較適當，可避免植冠非均一性及風向的干擾，也就是植株高度若為1公尺，則以觀測點為中心，半徑100公尺之圓面積需為平整之觀測面，但基本上，觀測面越平整及越大，量測數值越具代表性。

三、通量塔及全球建置情形

每年全球約有十億噸的CO_2排放至大氣中，主要是森林減少及燃燒石化原料所致。依據IPCC的研究，超過25%人類所排放之CO_2 由植物所吸收，因此1997年所簽訂之『京都議定書』同意將維持或造林等政策執行，可折抵因排放CO_2所須負擔之碳稅（carbon tax）。但科學家質疑對於大氣和生物圈間之碳交換機制不清楚的前提下，如何量化植物對減碳的潛勢？這是全球興起廣泛建置通量塔的主因之一。通量塔是依據通量量測原理所興建之氣象觀測平台，每個通量塔基本觀測項目如表一，包括一般氣象資料及通量量測資料。通量量測儀器及架設情形如圖一，所觀測項目涵蓋二氧化碳、可感熱、潛熱、淨輻射及土壤熱流等。另外，可依據其他研究主題加設通量塔的其他需求，如就空氣污染、溫室氣體及礦物元素含量等，加設相關量測設備以了解這些因子在生態體系內生成、傳輸、作用及消失的機制。

目前全球約有400個通量塔量測生物圈之CO_2 、水汽及能量的變化，所選擇植生包括針葉林、闊葉林、常綠森林、熱帶雨林、農地、牧草地、溼地及大草原等，分佈區域涵蓋北緯70度到南緯30度之間。圖二為全球通量塔分布情形。由圖中可知，通量塔分布最密集當屬北美洲及歐洲，南美洲集中在亞馬遜河流域，亞洲在俄羅斯、日本及中國大陸皆有設塔。

有鑒於通量塔如雨後春筍般的設立，成立國際性組織以進行相互交流及



圖一、通量量測系統基本架設情形。

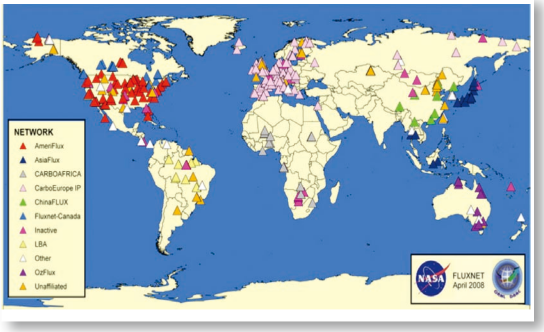
表一、通量塔基本氣象及通量觀測項目

氣象資料中文名稱	氣象資料英文名稱	單位
光合作用活化輻射量	Photosynthetic active radiation	μ mol $m^{-2}s^{-1}$
氣溫	Air temperature	℃
降水量	Precipitation	mm
相對溼度	Relative humidity	%
風速及風向	Wind speed and direction	ms^{-1}
大氣壓力	Barometric pressure	mbar
土溫	Soil temperature	℃
二氧化碳濃度	Carbon dioxide concentration	ppm
通量中文資料	通量英文資料	單位
二氧化碳通量	CO_2 flux	μ mol $m^{-2}s^{-1}$
可感熱通量	Sensible heat flux	Wm^{-2}
潛熱通量	Latent heat flux	Wm^{-2}
淨輻射量	Net radiation	Wm^{-2}
土壤熱流通量	Soil heat flux	Wm^{-2}

資料共享是一項重要工作。通量觀測網（Fluxnet）（www.fluxnet.ornl.gov）是一項結合全球環境觀測系統的計畫，除確保通量塔資料格式及品質一致外，透過舉辦研討會以整合通量塔運作流程及交換量測經驗，同時希望由地面實測值以校驗衛星資料，並且開發地表參數以改善氣候預測模式的準確度。另外，以洲際為區域之通量網站也陸續成立，如美洲之AmeriFlux（public.ornl.gov/ameriflux）、歐洲之CarboEurope（www.carboeurope.org）以及亞洲之AsiaFlux（www.asiaflux.net）等。個別國家也成立專屬網站，如中國大陸之ChinaFlux（www.chinaflux.org）、韓國之KoFlux（koflux.yonsei.ac.kr）與俄羅斯之Tcos-Siberia（www.bgc.mpg.de）等。我國目前有四個通量塔登錄在Fluxnet網站上，以東華大學架設之棲蘭山測站及中興大學之北東眼山測站較具規模。

四、結論

通量技術在農業研究上的運用，隨著科技的進展而不斷的更新，打破過去在空間及時間上的限制，同時更能以長時間且精確的描述作物生長及監測農業環境，可解決一些需要整年或日夜資料的研究主題。尤其以全球尺度CO_2平衡而言，有所謂的“missing sink”，意即對部分碳積存的去向並不清楚。雖然針對這方面已有相當多研究，但仍有許多不確定因素無法考量，因此各國紛紛建立長期觀測碳通量的網狀研究，希望利用通量量測特性建立長期資料庫，能對整個生態系的碳平衡，及氣候變遷所帶來的衝擊有更多瞭解。目前本所在溪口農場設有通量塔一座，配合農業長期生態計畫之執行，詳細紀錄試區內氣象、作物、土壤及病蟲害等，對於農業環境內各項能量傳送或物質之流布能有更清楚了解，同時，本年度（98年）通量塔量測之即時資料將透過無線網路系統與國際通量觀測網接軌，預期將可提高本所在國際上有關環境監測的能見度。



圖二、全球通量塔之分布情形。（圖片經www.fluxnet.ornl.gov網站同意取用。）

五、參考文獻

Brustsaert, W. 1982. Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.

Kizer, M. A. and R. L. Elliott. 1991. Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. Trans. ASAE 34: 387-392.

Rosenberg, N. J., B. L. Blad and S. B. Verma. 1983. Microclimate;The Biological Environment. 2nd ed. John Wiley and Sons. New York.

Schimel, H. P., C. Susan, B. Grimmond, F. Cropley, B. Offerle and H. B. Su. 2000. Measurements of CO_2 and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. Agric. For. Meteorol. 103: 357-374.

Swinbank, W. C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. J. Meteorol. 8:135-145.